第 37 卷第 13 期 2017 年 7 月
生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37, No.13 Jul., 2017

DOI: 10.5846/stxb201601130086
张敏,蔡庆华,渠晓东,邵美玲.三峡成库后香溪河库湾底栖动物群落演变及库湾纵向分区格局动态.生态学报,2017,37(13):4483-4494.
Zhang M, Cai Q H, Qu X D, Shao M L.Macroinvertebrate succession and longitudinal zonation dynamics in Xiangxi Bay, after impoundment of the Three Gorges Reservoir.Acta Ecologica Sinica,2017,37(13):4483-4494.

三峡成库后香溪河库湾底栖动物群落演变及库湾纵向分区格局动态

张 敏[1,2],蔡庆华[2,*],渠晓东[1],邵美玲[2]
1 中国水利水电科学研究院水环境研究所,北京 100038
2 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室,武汉 430072

摘要:水库生态系统演替是水库生态学研究及水库管理过程中都比较关注的问题。三峡水库自 2003 年 6 月成库以来,有关水库生态系统演替的研究却鲜见报道。以三峡水库香溪河库湾底栖动物为研究对象,分析了自 2003 年 8 月—2010 年 7 月 3 个不同蓄水阶段底栖动物群落的演变状况,并对库湾纵向分区格局的动态变化进行了探讨。结果表明,水库蓄水后,摇蚊科和颤蚓科成为第一批定殖者,并以摇蚊科为主;随后,颤蚓科中的霍甫水丝蚓逐渐成为优势类群;直到 2004 年 4 月仙女虫科的肥满仙女虫与霍甫水丝蚓共同主导群落。一期蓄水后约 1a,底栖动物密度和物种数呈现出明显的增长趋势,空间上呈现出“中间高、两头低”的格局。库湾总体密度于 2006 年 4 月达到最高值,高达 24146 个/m^2。二期蓄水导致底栖动物总密度显著降低,而三期蓄水后则变化相对较小。随着时间的增长,库湾底栖动物偶见种出现的频率逐渐降低,群落逐渐趋于稳定。基于 TWINSPAN (two-way indicator species analysis)的分析,一期蓄水后期,香溪河库湾纵向上底栖动物群落结构呈现出稳定的分区格局,库湾中部区域呈现出相同的群落类型,无季节变化;而自二期蓄水开始,库湾纵向上大部分样点的群落类型发生改变,表明二期蓄水的干扰较强;之后呈现出季节性波动,此种格局与水位的季节波动相关联,表明三峡水库底栖动物逐渐适应水库周期性的调度,群落结构呈现稳定的季节性周期波动。

关键词:大型深水水库;底栖动物;生态系统演替;纵向分区;三峡水库

Macroinvertebrate succession and longitudinal zonation dynamics in Xiangxi Bay, after impoundment of the Three Gorges Reservoir

ZHANG Min[1,2], CAI Qinghua[2,*], QU Xiaodong[1], SHAO Meiling[2]
1 *Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*
2 *State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430072, *China*

Abstract: Studying the succession of reservoir ecosystems is of great importance to both freshwater ecosystem research and reservoir management. However, little research has been reported regarding the succession of the Three Gorges Reservoir ecosystem after its impoundment in June 2003. In the present study, we analyzed the macroinvertebrate succession and reservoir zonation of Xiangxi Bay, a tributary of the Three Gorges Reservoir, from August 2003 to July 2010 in different impoundment stages. We found that Chironomidae and Tubificidae were the first to colonize after the first impoundment, with Chironomidae as the main group. *Limnodrilus hoffmeisteri* dominated the community gradually, and *Nais inflata* established itself as an additional dominant species from April 2004. The total macroinvertebrate density and richness increased from the first stage, exhibited a spatial pattern of “high in the middle and low in the two edges”. The density peaked in April 2006 (24,146 ind./m^2), declined remarkably after the second stage of impoundment, and changed slightly after the third stage. Fewer rare species were observed in the third stage than in the other two stages, which indicated that the community became more stable gradually. Two-way indicator species analysis revealed a stable zonation pattern during

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51309031);国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2012ZX07501002-07);国家重点实验室专项经费资助项目(2014FBZ03)
收稿日期:2016-01-13; **网络出版日期**:2017-02-23
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: qhcai@ ihb.ac.cn

the first stage; however, the community type changed during the second stage, which implied that the stage was associated with strong disturbance. Afterward, we observed seasonal fluctuations in the community type, which was coupled to seasonal fluctuations of the water level. This indicated that the macroinvertebrate assemblage gradually adapted to the periodic reservoir operation of the Three Gorges Reservoir and that the community structure exhibited stable periodic fluctuations.

Key Words: Large reservoir; macroinvertebrate; ecosystem succession; longitudinal zonation; Three Gorges Reservoir

水库蓄水通常被视为对一个旧的生态系统的扰动,或者一个新的生态系统的形成[1]。水库蓄水后,水体流速变缓、透明度升高、营养盐聚集、沉积率升高,从而导致生态系统各环境因子发生巨大变化[1-3]。这些非生物因子的变化通过影响水库中生物的食物来源及生存环境进而对生物的密度、多样性等群落特征造成影响[4-5],从而影响生态系统的整体格局。由江河截流建成的水库在纵向形态上不同于天然的湖泊,天然湖泊通常在中部区域最深,而水库通常在坝前区域最深。因此,水库在纵向上通常会形成各种环境因子的梯度。一个典型的水库通常被分为几个不同的区域:河流区、过渡区和湖泊区[6-7]。各区域存在不同的理化特征,而环境的梯度则导致了各区生物群落的差异[1,8]。各区域的大小在不同的水库中是不同的,这主要取决于水库的形状、水体滞留时间、季节以及地理位置等因素[6-7]。

水库从形状上分为树枝状水库和树叶状水库[1],三峡水库是典型的树枝状水库,于2003年6月建成并开始一期蓄水运行。水库运行后,水文节律的改变使得库区水生态环境在很大程度上受到了影响[9-10],大部分支流因水库回水演变为库湾,形成水库生态系统。支流库湾虽是支流,但在树枝状水库中却是水库的主体,因此支流库湾的水生态系统状况可在较大程度上反映整个三峡水库的状态,因而得到较为广泛的关注。以研究较多的典型库湾——香溪河库湾为例,库湾形成后,因水流变缓、水体滞留时间延长,蓄水后第一年便暴发了严重的水华,并且近年来暴发频率和程度都呈上升趋势[11-13]。随着时间的增长,大部分生物群落在经历了第一次蓄水引起的巨大的生境改变发生剧烈波动后,逐渐趋于稳定状态[14]。各种水体理化因子、浮游生物、底栖动物以及底质理化因子等都呈现出一定的纵向分区格局[2,14-15]。

底栖动物作为水生态系统的重要组成部分,因其不同种类具有不同的敏感度,常被用于指示生态系统的变化[16-17]。并且,相对于浮游生物对环境变化的快速响应,底栖动物移动能力弱,在环境改变的条件下,很难快速地做出主动响应,只能被动地耐受环境的变化,因此可以更好的反映环境因子的影响,尤其是相对较长时间尺度上生态系统对环境变化的响应,使得其在生态系统评价中应用得越来越广泛[18-20]。

三峡水库一期蓄水后期,香溪河库湾底栖动物群落结构逐渐稳定,库湾中部区域全年维持相同的群落类型,无季节变化[14]。但是彼时,三峡水库水位在135—139 m之间波动,最大水位落差仅4 m;而2006年10月二期蓄水后最大水位落差涨至11 m,三期蓄水后涨至约30 m。较高的水位波动会引起水体混合程度的增加,影响悬浮物质的沉积,改变底泥的性质,影响底栖动物的栖息环境,从而可能对其群落结构造成影响[5,21]。并且,自三峡水库蓄水成库以来,对于任何水生生物类群的长期演变动态均未见有研究报道,缺乏对三峡水库生态系统演替研究的支撑。因此,本研究以底栖动物为研究对象,基于自三峡成库以来(2003年8月—2010年7月)香溪河库湾底栖动物群落的调查,分析底栖动物在蓄水初期的演替动态,研究在不同蓄水阶段底栖动物群落结构的差异及库湾纵向分区格局的变化,探讨蓄水过程的影响,不仅可为研究新建的大型水库生态系统的演变提供重要的理论支撑,也为水库生态系统的综合管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样品采集

三峡大坝坐落于湖北省宜昌市境内。水库的蓄水分3期完成。一期蓄水在2003年6月完成,坝前水位135 m;二期蓄水在2006年10月完成,坝前水位最高升至156 m;三期试验性蓄水于2008年10月完成,最高水位达到173 m(设计最高水位175 m)。香溪河是三峡水库位于湖北省境内靠近大坝的最大支流,位于大坝

上游 38 km 处,长约 94 km,流域面积 3099 m^2[22]。自三峡水库一期蓄水后,香溪河下游演变为库湾——香溪河库湾。在三期蓄水后,随着三峡水库水位的增加,库湾的长度也随之增长。

在香溪河库湾设置 9 个采样点(XX01—XX09),其中,一期蓄水期间为 7 个样点:XX01—XX07;二期与三期蓄水期间也是 7 个样点,分别为:XX01,XX02,XX03,XX05,XX07,XX08 与 XX09,如图 1 所示。样点均位于河道的中心位置,XX01—XX09 距香溪河口的距离依次为:2.33、5.33、10.7、15.1、20.0、21.5、25.0 km 和 26.9 km。2003 年 8 月 — 2004 年 12 月每月进行样品采集(2003 年 12 月和 2004 年 11 月样品丢失)用于分析初期的群落演替,2005 年 1 月—2010 年 7 月进行季度采样:1 月(冬季)、4 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)。其中,2008 年冬季的样品因暴风雪而延迟到 2 月份。

采样及分析方法参照中国生态系统研究网络(CERN)规范执行[23]。底栖动物采集使用 1/16m^2 Peterson 采泥器。本研究属长期观测研究,每样点采集 1 个样品。样品经 200 μm 纱网筛洗干净后,在解剖盘中将底栖动物检出,置入 50 mL 的塑料标本瓶中,用 10%福尔马林保存。大多数标本至少鉴定到属,鉴定后计数,并最终折算成每平方米的密度(个/m^2)。

图 1　三峡水库香溪河库湾样点设置

Fig.1　Distribution of sampling sites in the Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir

1.2　数据处理

采用 Statistica 10.0 软件进行样点聚类分析,选取 Ward 法,以欧氏距离衡量样点之间的相似性。采用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析,比较各区之间底栖动物的差异。

采用 PC-ORD 4.0 软件进行 TWINSPAN 分组(two-way indicator species analysis),分析各样点群落结构类型及其指示种[24]。群落类型的命名是基于确限度和恒有度的概念。确限度是指一个物种在某个组中出现的程度,恒有度是指每个物种在特定组的样方中出现的次数。恒有度在 30%—75%之间,同时确限度在 3—5 之间的物种被称为该组的特征种[25]。但是,香溪河中由于物种的单一性,优势度特别高,因此计算出的恒有度通常都超过 75%,因此,此处将其修改为确限度在 3—5 之间同时恒有度 ≥ 30%的物种被认为是该组的特征种并用来对群落命名。用于 TWINSPAN 分析的底栖动物数据采用物种相对丰度数据。

样点分布图采用 ArcGIS 9.3 软件绘制,其它图形采用 Origin 8.0 软件完成。

2　结果

2.1　三峡成库后香溪河库湾底栖动物群落演变

2003 年 6 月,三峡水库进行一期蓄水。作为蓄水后从河流生态系统演变而来的水库生态系统,香溪河库湾 2003 年 8 月采集到的第一批底栖动物是摇蚊科的多足摇蚊属(*Polypedilum*)、前突摇蚊属(*Procladius*)及菱跗摇蚊属(*Clinotanypus*)及颤蚓科的水丝蚓属(*Limnodrilus*),有别于原先河流态以四节蜉科的四节蜉属(*Baetis* sp.)和摇蚊科的直突摇蚊属(*Othrocladius* sp.)为主的群落结构。随后,新的颤蚓科类群尾鳃蚓属(*Branchiura*)、盘丝蚓属(*Bothrioneurum*)、管水蚓属(*Aulodrilus*)、摇蚊科的二叉摇蚊属(*Dicrotendipes*)及仙女虫科的仙女虫属(*Nais*)和泥盲虫属(*Stephensoniana*)等物种不断入侵,且在 2004 年 3、4 月份采集到软体动物(*Hippeutis* 和 *Limnoperna*)。表1展示了三峡水库蓄水后1年半的时间内香溪河库湾逐月采集的底栖动物演

表 1 三峡蓄水后 1 年半内香溪河库湾底栖动物优势类群的演变(相对丰度)

Table 1 Succession of the macroinvertebrate in the first year after the impoundment of the Three Gorges Reservoir (relative abundance)

物种名 Species	2003-08	2003-09	2003-10	2003-11	2004-01	2004-02	2004-03	2004-04	2004-05	2004-06	2004-07	2004-08	2004-09	2004-10	2004-12
Clinotanypus sp.	7.14	3.33													
Limnodrilus hoffmeisteri	7.14	50.00	56.5	76.05	44.2	22.09	40.48	28.63	16.33	40.87	75	54.03	76.41	80.79	82.24
Polypedilum scalaenum group	21.43	6.67	4.35	5.63	27.54	20.93	28.57	0.86	0.68	1.98			0.26	0.12	0.36
Procladius sp.	64.29	33.33	26.10	2.82	22.46	51.16	24.6	1.28	42.52	51.99	7.13	6.45	4.10	1.07	4.39
Branchiura sowerbyi		3.33			2.17	3.49	5.56	0.43		0.4	1.79	0.81	1.28	1.07	1.17
Nematoda		3.33								0.79			2.31	0.72	0.09
Aulodrilus sp.			4.35										3.07		
Palaemonetrs sp.			4.35												
Stephensoniana trivandrana			4.35	8.45				0.43						0.12	0.09
Aulodrilus pluriseta				2.82	0.73							4.03		0.12	0.18
Dicrotendipes sp.				1.41	0.73			4.70							
Tubificidae sp.1				1.41											
Tubificidae sp.2				1.41	2.17			0.86	3.40	0.40	8.92	0.77	0.77		0.09
Bothrioneurum vejdovskyanum						2.33						0.81	0.26	0.12	0.09
Hippeutis cantori							0.79								
Corbicula nitens								0.43							
Limnoperna lacustris								3.41							
Nais inflata								58.54	33.67	2.38					
Tanytarsus sp.								0.43			1.79				0.09
Chironominae sp.1									0.34						
Chironomus plumosus									1.02						
Paranais frici									2.04						
Aulodrilus pigueti										0.40		33.10		4.77	2.24
Teneridrilus mastix										0.79			11.54	0.24	0.18
Chironomidae sp.1											1.79				
Chironomidae sp.2											1.79				
Orthocladius sp.											1.79				
Aulodrilus limnobius														10.74	6.64
Polypedilum beckae														0.12	2.06
Ceratopogonidae spp.															0.09

替状况及相对丰度。可以看出,最先入侵的菱跗摇蚊属(*Clinotanypus* sp.)在蓄水后第 4 个月未再出现。霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、梯形多足摇蚊(*Polypedilum scalaenum* group)、前突摇蚊(*Procladius* sp.)3 个最先入侵种是自蓄水以来一直存在的种类,随后出现的苏氏尾腮蚓(*Branchiura sowerbyi*)出现频率也较高。从各物种相对丰度的变化上,最初的密度优势种为前突摇蚊和梯形多足摇蚊,随后,霍甫水丝蚓所占比例逐渐升高。2004 年 4 月、5 月,新出现的肥满仙女虫(*Nais inflata*)相对丰度高达 58.29%和 33.67%,成为优势物种。对比 2003 年与 2004 年的 8、9、10 和 12 月份可以发现,霍甫水丝蚓代替最先入侵的优势类群——前突摇蚊和梯形多足摇蚊成为香溪河库湾的优势类群,并且在 2004 年底呈现出逐渐稳定的趋势。

2.2　香溪河库湾底栖动物群落结构时空动态

2.2.1　不同蓄水阶段库湾底栖动物密度变化

通过对比 3 个蓄水阶段香溪河库湾底栖动物密度可以发现,底栖动物密度在一期蓄水初期极低,自 2004 年 10 月起开始有显著的增加,2006 年 4 月份达到最高值(24146 个/m^2)。密度增加主要以中上游区域为主。自 2006 年 10 月二期蓄水之后,底栖动物密度有所下降;三期蓄水后与二期蓄水期间库湾底栖动物平均密度无较大变化(图 2)。一期蓄水后期开始,密度呈现出明显的“中间高、两头低”的空间格局。

从季节变化角度,一期蓄水后期(2004 年 10 月之后),底栖动物密度呈现持续升高趋势,一直到 2006 年呈现出季节性格局,且在 4 月份出现密度最高值;二期蓄水后,季节性格局未发生变化,每年密度最高值仍出现在 4 月份。

2.2.2　不同蓄水阶段库湾底栖动物物种丰富度的变化

物种丰富度的空间分布状况见图 3。总体变化趋势与密度相似,一期蓄水后期物种丰富度最高,最高值出现在 2006 年 4 月;而二期蓄水后,丰富度明显下降,三期蓄水后相较于二期蓄水期间并无明显变化。空间上,自一期蓄水期间后期开始,与密度相似,表现出“中间高、两头低”的格局。

在季节变化上,物种丰富度年内的峰值不同于密度的波动。2004 年,最高的物种丰富度发生在 4—6 月份;2005—2010 年(除 2008 年之外),每年的最高物种丰富度都发生在 4 月份,而 2008 年最高物种丰富度出现在 2 月份。

从各阶段总体而言,第一期蓄水期间(2003 年 8 月—2006 月 7 月),共出现 58 个分类单元,有 14 个物种仅出现 1 次。其中,第 1 年(2003-08—2004-7)发现 28 个物种,4 个仅出现 1 次(图 4);第 2 年(2004-08—2005-07)发现 25 个物种,3 个物种出现 1 次;第 3 年(2005-10—2006-07)发现 39 个物种,7 个物种出现 1 次。而二期蓄水期间(2006-10—2008-07)所采集到的分类单元数有所降低,35 个物种,9 个仅出现 1 次。三期蓄水后的两年间(2008-10—2010-07)共采集到 31 个物种,其中 1 个物种仅出现 1 次。比较 3 个蓄水阶段仅出现一次的物种数量可知,出现频率较低的物种数明显减少,说明群落的物种组成格局已逐渐形成趋于稳定的状态。

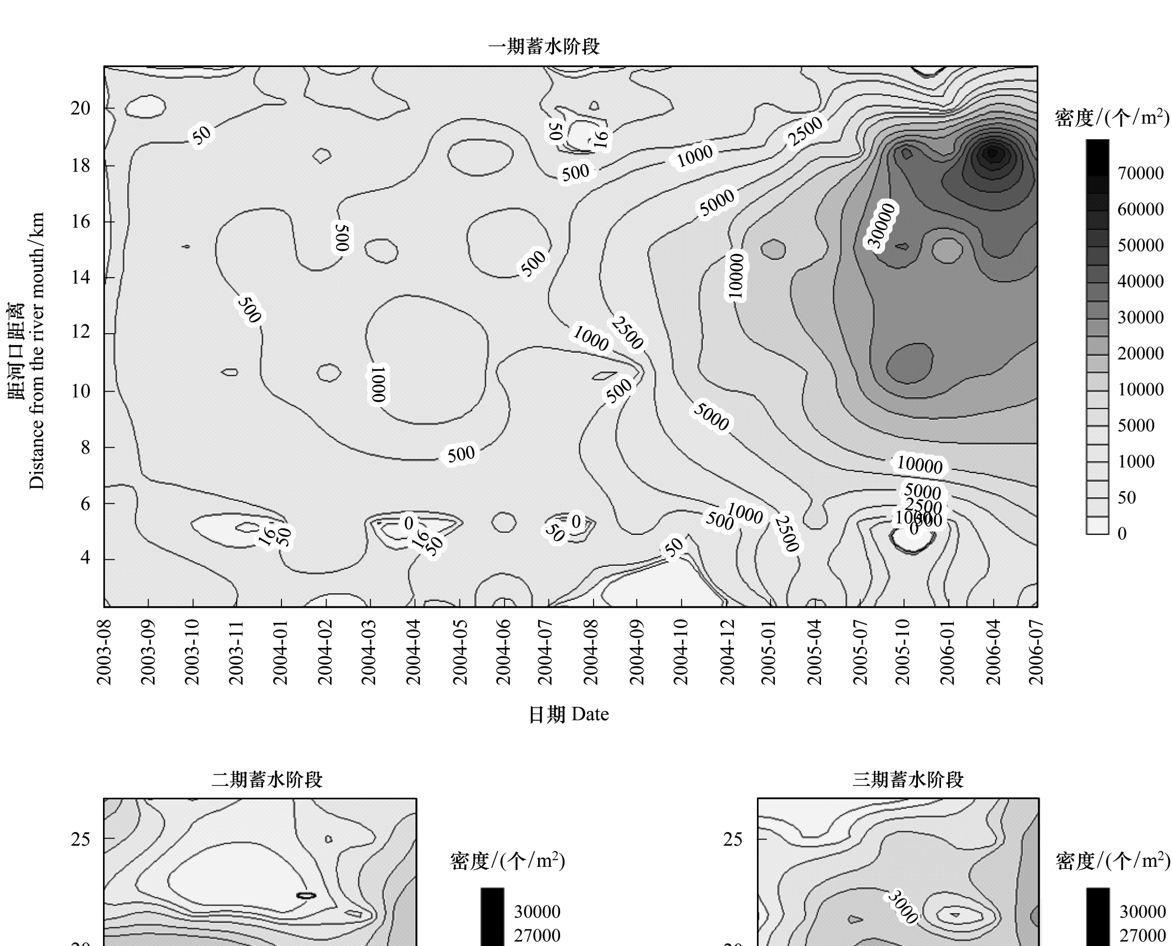
2.3　基于底栖动物群落结构的香溪河库湾纵向分区格局

2.3.1　聚类分析

基于密度和物种丰富度这 2 个指标,对各样点进行聚类分析,结果表明(图 5),XX01 与 XX02 为一组(组 1,下游),XX03 与 XX05 为一组(组 2,中游),XX07、XX08、XX09 为一组(组 3,上游)。其中,组 1 和组 3 之间距离较近,相对较为相似。单因素方差分析(one-way ANOVA)表明,各组之间物种数无显著差异($P > 0.05$),而密度则组间差异显著($P < 0.05$)。各组在不同蓄水阶段的密度及物种数的变动见图 6。由图可知,二期蓄水后,处于库湾下游和上游的组 1 和组 3 的底栖动物密度均显著升高,处于库湾中部的组 2 则明显下降;物种数则在二期蓄水后库湾总体上均有所下降。三期蓄水后,各指标波动并不剧烈,但是位于库湾上游的组 3 的密度较二期蓄水期间明显升高。

2.3.2　基于 TWINSPAN 分组的分区格局的时间演变

邵美玲[26]曾对一期蓄水期间的底栖动物进行 TWINSPAN 分组,结果如表 2 所示,所有样点被分为 5 个



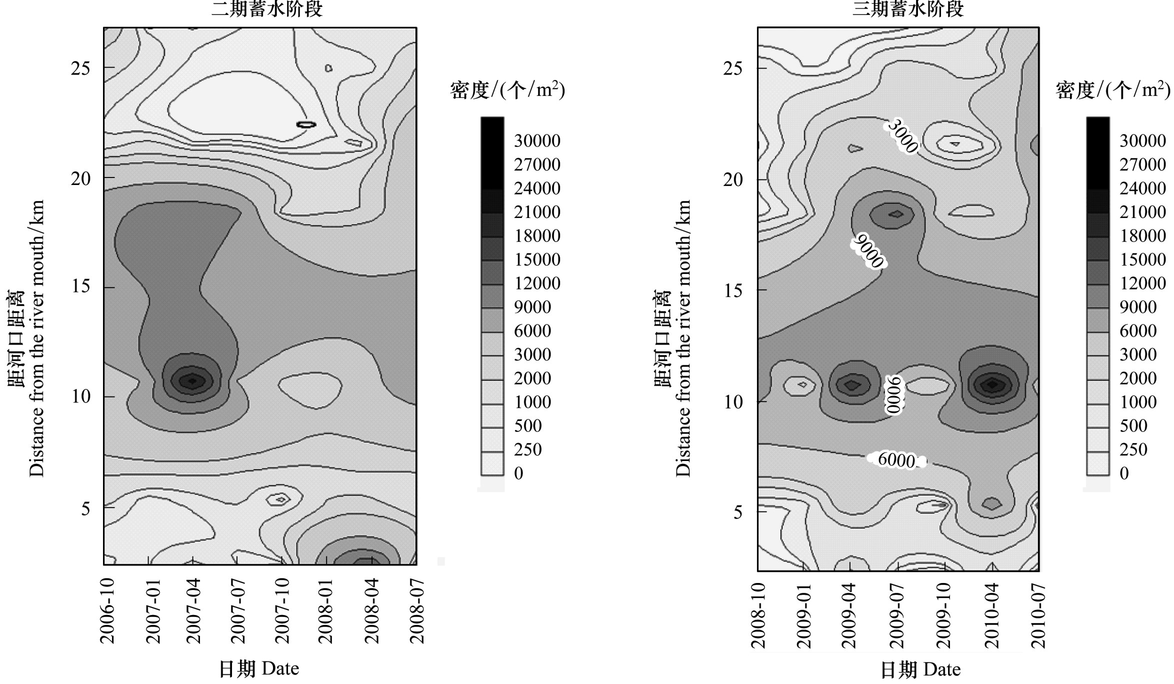


图 2　三个蓄水阶段库湾平均底栖动物密度的变化对比

Fig.2　Comparison of the macroinvertebrate's mean density in the Xiangxi Bay in the three different impoundment stages

组,各组的群落类型见表 3。可见,在一期蓄水期间,自 2004 年 10 月起,处于库湾中部区域的 XX03—XX05 群落类型稳定为 group 3 型(*Limnodrilus hoffmeisteri-Nais inflata*),自 2005 年 7 月起,XX06 区域的底栖动物群落类型也变为 Group 3 型并稳定。

本研究基于二期与三期蓄水期间各样点底栖动物物种相对丰度进行 TWINSPAN 排序将所有样品共计分为 4 组(表 4),分组后分别分析了其群落类型及特征物种(表 5)。由于 Group3 仅有 1 个样品,因此在接下来的群落类型及特征物种分析中被排除。*L.hoffmeisteri* 由于具有较高的相对丰度以及出现频率因而在各个组中

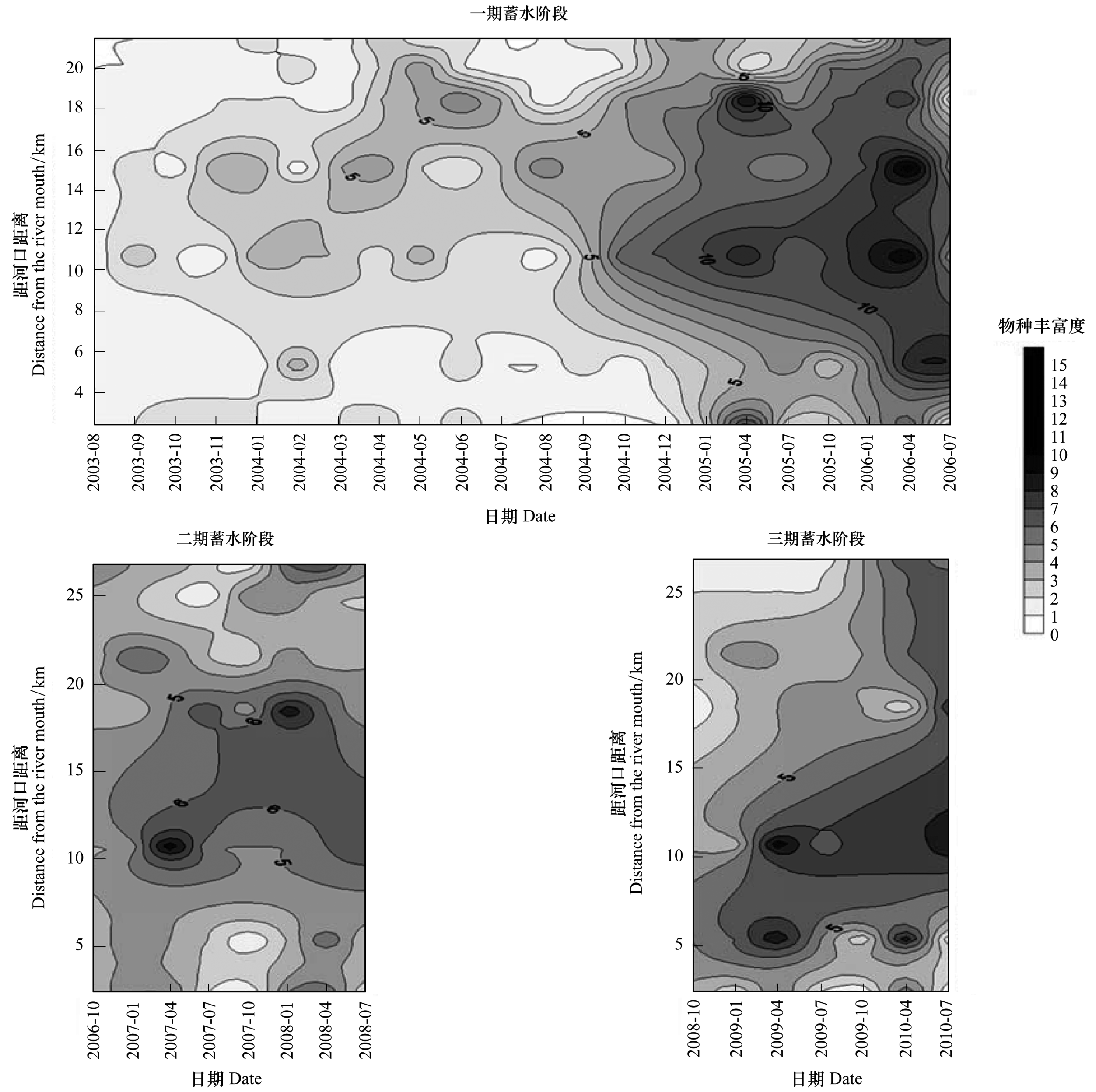


图 3　三个蓄水阶段香溪河库湾平均底栖动物物种丰富度的变化对比

Fig.3　Comparisons of macroinvertebrate richness in the Xiangxi Bay during different impoundment stages

表 2　三峡水库一期蓄水阶段香溪河库湾底栖动物 TWINSPAN 分组[14]

Table 2　TWINSPAN classification results based on the species relative abundance of macroinvertebrates in the Xiangxi Bay during the 1st impoundment stage of the Three Gorges Reservoir[14]

年-月 Year-Month	XX01	XX02	XX03	XX04	XX05	XX06	XX07	XX09
2003-10	Group 2		Group 2	Group 3	Group 2	Group 3		
2004-01	Group 3		Group 2	Group 1	Group 2	Group 1	Group 2	
2004-04	Group 3		Group 4	Group 3	Group 3	Group 4	Group 2	
2004-07			Group 3	Group 3	Group 2	Group 2		Group 5
2004-10		Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 2	Group 2	Group 5
2005-01	Group 2	Group 2	Group 3	Group 3	Group 3	Group 2	Group 1	Group 5
2005-04	Group 3	Group 4	Group 3	Group 3	Group 3	Group 2	Group 3	Group 5

续表

年-月 Year-Month	XX01	XX02	XX03	XX04	XX05	XX06	XX07	XX09
2005-07	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3
2005-10	Group 3	Group 2	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 2
2006-01	Group 4	Group 2	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 1	
2006-04	Group 4	Group 4	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	
2006-07	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	Group 3	

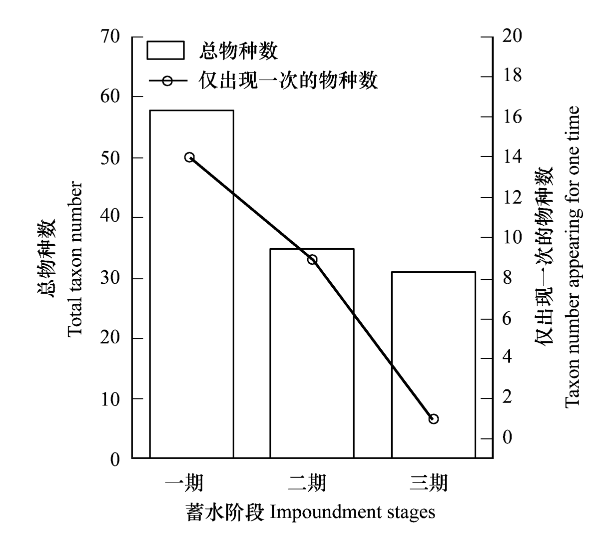


图 4 不同蓄水阶段香溪河库湾底栖动物总物种数及出现一次的物种数对比

Fig.4 Total taxon number in the Xiangxi Bay and the number of taxon appearing for one time during different impoundment stages

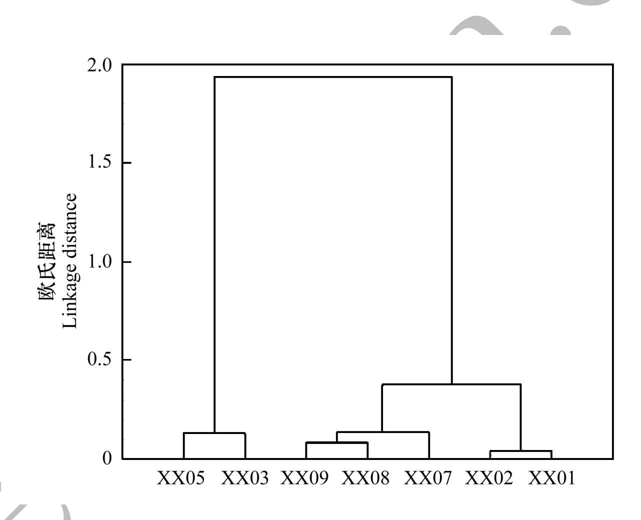
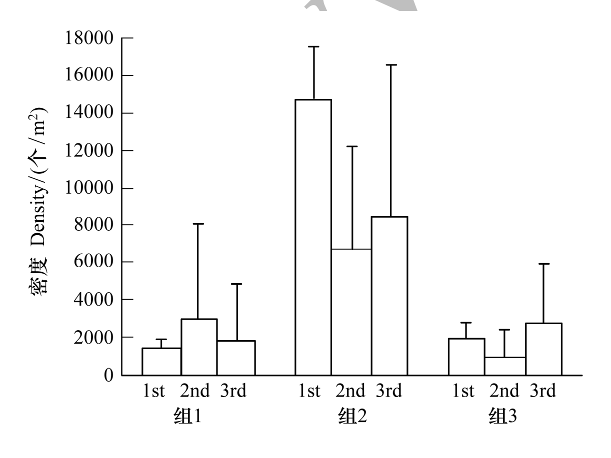


图 5 基于底栖动物密度和物种丰富度的样点聚类分析

Fig.5 Results of the Cluster Analysis based on the density, biomass and taxon number



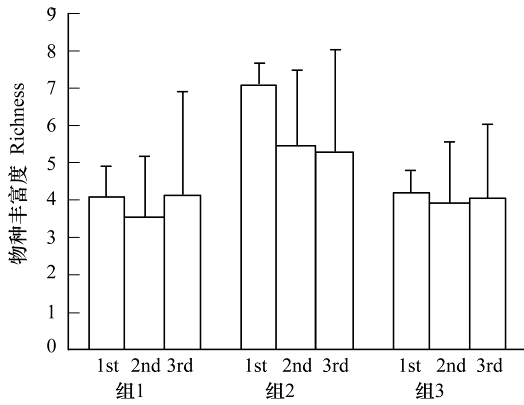


图 6 聚类分析各组在不同蓄水阶段的密度和物种丰富度对比

Fig.6 Comparisons of the macroinvertebrate density and species richness between groups divided by cluster analysis

表现为特征种之一。秋季,XX03—XX08 群落结构(Group 1,*Limnodrilus-Branchiura* 群落类型)在二期蓄水期间相对稳定,而 XX01、XX02 和 XX09 则表现出明显的年际间波动。在三期蓄水期间,XX03—XX08 的范围内除 XX05 之外仍然保持同样的群落类型,XX05 则表现为 *Limnodrilus-Procladius*(Group 2)群落类型。冬季,整

个库湾的群落类型均不稳定,年际间波动较大,但主要是 *Limnodrilus-Branchiura* 群落类型以及 *Limnodrilus-Nais-Stictochironomus*(*Group* 4)为主。春季,在二期蓄水后的第 1 年,群落结构并不稳定,主要以 *Limnodrilus-Branchiura* 和 *Limnodrilus-Nais-Stictochironomus* 为主,但自第 2 年开始,除 XX09 外均以 Group 4 主导群落。夏季,自二期蓄水后第 2 年开始,在 XX02—XX05 区域内的群落结构相对稳定,为 *Limnodrilus-Procladius* 类型。

表 3　三峡水库一期蓄水阶段香溪河库湾底栖动物 TWINSPAN 分组的群落类型和特征种[14]

Table 3　Community type, characteristic species of each group classified by TWINSPAN in the Xiangxi Bay during the 1st impoundment stage of the Three Gorges Reservoir [14]

组 Group	群落类型 Community type	特征种 Characteristic species	确限度 Degree of fidelity	恒有度 Constancy/%
1	*Polypedilum-Limnodrilus-Tanytarsus*	*Polypedilum scalaenum* gr.	5	100
		Limnodrilus hoffmeisteri	5	50
		Tanytarsus sp.	5	50
2	*Procladius-Limnodrilus*	*Procladius* sp.	5	67
		L. hoffmeisteri	5	56
3	*Limnodrilus*	*L. hoffmeisteri*	5	100
4	*Nais*	*Nais inflata*	5	100
5	*Baetis*	*Baetis* sp.	4	50

表 4　三峡水库二期与三期蓄水阶段香溪河库湾底栖动物 TWINSPAN 分组

Table 4　TWINSPAN classification results based on the species relative abundance of macroinvertebrates in the Xiangxi Bay during the 2nd and the 3rd impoundment stages of the Three Gorges Reservoir

季节 Seasons	年-月 Year-Month	XX01	XX02	XX03	XX05	XX07	XX08	XX09
秋季 Autumn	2006-10	G2	G1	G1	G1	G1	—	G1
	2007-10	G1	G1	G1	G1	G1	G1	G1
	2008-10	G2	G2	G1	G1	G1	G1	—
	2009-10	G2	G1	G1	G2	G1	G1	G2
冬季 Winter	2007-01	G4	G1	G1	G1	G4	—	G4
	2008-02	G4	G4	G4	G1	G4	G4	G4
	2009-01	G4	G1	G4	G1	G2	G4	—
	2010-01	—	—	—	—	—	—	—
春季 Spring	2007-04	G4	G1	G4	G1	G4	—	G1
	2008-04	G4	G4	—	G4	G4	G4	G2
	2009-04	G4	G4	G4	G4	G4	G4	G1
	2010-04	G4	G4	G4	G4	G4	G4	
夏季 Summer	2007-07	G1	G2	G2	G1	G2	G1	
	2008-07	G4	G2	G2	G2	G2	G2	G2
	2009-07	G2	G2	G2	G2	G1	G1	G2
	2010-07	G3	G2	G2	G2	G1	G2	G1

G: 组 Group

3　讨论

3.1　底栖动物群落演变

寡毛类和摇蚊向来是新生水库的主要优势类群,其可以通过穴居、快速繁殖等方式来降低水位剧烈波动

对其造成的影响[27]，从而在新生水库快速定殖。在香溪河库湾，除三峡水库开始蓄水后 1 年间(2003 年 6 月—2004 年 7 月)摇蚊科相对丰度相对较高[26]之外，自 2004 年 8 月起，寡毛类一直是库湾的绝对优势类群，全年相对丰度都在 90%以上，且以库湾中部底栖动物的贡献最大。相对于一期蓄水期间，二期蓄水后底栖动物密度急剧下降，但是寡毛类的优势地位并未受到影响。通常而言，在有机质丰富的底泥中，寡毛类密度会逐渐增加，从而取代耐受力较差的底栖动物成为优势类群[28]。香溪河库湾中部区域霍甫水丝蚓的高密度表明该区域内相对较高的有机质含量。

表 5 二期与三期蓄水阶段香溪河库湾底栖动物 TWINSPAN 分组的各组群落类型及特征种

Table 5 Community type, characteristic species of each group classified by TWINSPAN in the Xiangxi Bay during the 2nd and the 3rd impoundment stages

组 Group	群落类型 Community type	特征种 Characteristic species	确限度 Degree of fidelity	恒有度 Constancy/%
1	*Limnodrilus-Branchiura*	*Limnodrilus hoffmeisteri*	5	98
		Branchiura sowerbri	3	33
2	*Limnodrilus-Procladius*	*Limnodrilus hoffmeisteri*	4	88
		Procladius sp.	3	73
3	—	—	—	—
4	*Limnodrilus-Nais-Stictochironomus*	*Limnodrilus hoffmeisteri*	3	73
		Nais inflata	3	67
		Stictochironomus sp.	3	58

Group 3 样品数量不足，在分析中被剔除

二期蓄水后水位波动幅度的增大可能是导致库湾底栖动物密度下降的主要原因，因为剧烈的水位波动通常会引起底栖动物密度的急剧下降[27, 29]。但是，三期蓄水最大水位落差进一步升高后，底栖动物密度虽较二期蓄水期间有所变化但相对较小。主要原因是二期蓄水后的较大水位落差已经引起了底栖动物群落的巨大变化，因此三期蓄水后水位变幅的进一步增大只能在一定程度上进一步对底栖动物造成影响，因而其影响程度较二期蓄水弱。类似的情况在对大型水生植物的研究中也有出现，有研究表明，湖泊水位波动幅度的较大改变造成湖泊大型水生植物生物量的急剧降低，并且在第 1 年下降最为剧烈[30]。

随着三峡水库蓄水进入第 3 阶段，香溪河库湾偶见种出现的频率逐渐降低，表明随着时间的发展，底栖动物群落的物种组成格局正逐渐趋于稳定。底栖动物以生长在水底或沉积到水底的水生植物或碎屑为食，其群落结构与格局不仅受到这些食物的影响，而且受到水动力条件等影响沉积过程的因素的影响[7]，并且因其生存在底泥中，直接受到底泥理化性质的影响[31]，因而底栖动物是水生态系统中一个非常综合的指标，是指示水生态系统特征的较好因子，尤其可以反映较长时间尺度上水生态系统的变化趋势。因此，香溪河库湾底栖动物群落格局趋于稳定也反映了整个水库生态系统的逐渐稳定。

3.2 香溪河库湾纵向分区格局

一期蓄水期间，Shao 等[14]的研究表明，香溪河库湾分为 3 个区，XX01—XX02、XX03—XX05、XX07—XX09。二期蓄水后，底栖动物密度、物种丰富度的空间格局并未受到明显影响。二、三期蓄水期间分区与一期蓄水期间相似：XX01—XX02 为一区(干流区)，XX03—XX05 为一区(湖泊区)，XX07—XX09 为一区(过渡区)。这 3 个区中，干流区底栖动物密度最低且群落最不稳定。有研究表明，河口区域(干流区)由于流速的降低通常会引起悬浮颗粒的沉积增加。但是，当水流速度因干流的顶托作用而加强时，较强的水体干扰则会导致先前沉积的物质再悬浮[32]。因此，河口的栖息环境通常具有波动性和不稳定。而不稳定的栖息环境则通常拥有较低的物种密度[33]。在湖泊区，底栖动物密度是最高的。该区域内较高的沉积率[27]表明环境的相对稳定并且不易受到外界因素的干扰，因此，稳定的生境是该区域内底栖动物高密度的主要原因之一。在过渡区，二期蓄水期间底栖动物密度无规律性的变化，而在三期蓄水后，密度表现出逐渐上升的趋势。XX06，作为一期蓄水期间调查的样点，自 2005 年 4 月起逐渐演变为湖泊区的群落类型[14]。因此，Shao 预测，二期蓄水

后,随着水位的上升,XX07 也会很快演变为湖泊区[14]。本研究的结果表明,二期蓄水后 XX07 仍处于过渡区,其密度仅仅是从三期蓄水后才逐渐表现为增加的趋势。这表明自三期蓄水后该样点才逐步开始向湖泊区过渡,但至 2010 年 7 月仍未演变为湖泊区。该区域水深相对较浅,因而推断年内较大的水位波动对浅水区域具有持续性的显著影响。

二期蓄水后,尽管底栖动物密度及物种丰富度的纵向空间格局未发生改变,然而,底栖动物各样点群落类型却不再稳定,呈现出一定的季节性特征,与三峡水库水位的季节波动相吻合。秋季,在三期蓄水之后,随着水位落差的加大,*Procladius* sp.类型得以更多的出现。*Procladius* 通常出现在环境压力较大的区域[34],在意大利一个长期受污染的湖泊中,*Procladius* 被证明喜好有机质丰富的底泥[35],而在本研究中,它似乎更能表征受蓄水影响的受干扰的生境。冬季是高水位季节,水位波动较为平缓,水环境相对稳定。理论上,稳定的环境会带来稳定的群落[33],但是香溪河库湾冬季的底栖动物主要由两大群落类型组成:G1 (*Limnodrilus-Branchiura*)和 G4 (*Limnodrilus-Nais-Stictochironomus*),且无稳定的分区格局,与秋季(G1)和夏季(G4)均存在相似性。因此推断,冬季的底栖动物群落处于秋季和春季的过渡区,群落类型受到水位波动的影响较小,主要受季节性因素的影响,如温度、食物来源等。春季由于 *N. inflata* 密度的增加,群落类型演变为 *Limnodrilus-Nais-Stictochironomus*。对于 *N. inflata*,目前相关的生态学信息相对较少。一些研究表明,其在长江干流出现频率很高,尤其是 1 月和 4 月[36-37]。夏季洪水频发期则以 *L. hoffmeisteri* 和 *Procladius* sp.为主导类群,这两个类群代表了环境压力较大的条件下底栖动物群落状态[7, 34]。夏季洪水会引起所有环境因子(水流、温度及溶氧条件、光透性、营养盐分布等)急剧的改变,从而对水库生态系统中生物的栖息环境造成影响[38]。因此,洪水通过影响底栖动物食物来源、食物质量、栖息环境,并可能对底栖动物造成最直接的机械损伤,对底栖动物群落造成影响,从而是夏季底栖动物呈现出此种类型及格局的主要原因。

水库生态系统的分区受到水库自身形态、水体滞留时间等一系列因子的影响,尤其是后者,因此,分区格局容易产生季节性的波动。在三峡水库,除香溪河库湾之外,许多支流库湾都形成了分区状态,如童庄河库湾、青干河库湾、袁水河库湾、九畹溪库湾[14,39],总结其规律可以发现其支流库湾只要达到一定的长度,便会形成除干流区之外的其它区域[39],因此,纵向分区是三峡水库支流库湾普遍存在的特征。受到三峡水库不同蓄水阶段较大幅度水位波动的影响,各阶段分区格局也发生了变化。依据本研究的结果,分区目前形成了稳定的季节性波动格局。作为三峡水库的主体,支流库湾的分区格局逐渐稳定,表明三峡水库水生态系统格局也正向趋于稳定的方向发展。

参考文献(References):

[1] Baxter R M. Environmental effects of dams and impoundments. Annual Review of Ecology and Systematics, 1977, 8: 255-283.

[2] Ye L, Han X Q, Xu Y Y, Cai Q H. Spatial analysis for spring bloom and nutrient limitation in Xiangxi bay of three Gorges Reservoir. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 127(1/3): 135-145.

[3] Friedl G, Wüest A. Disrupting biogeochemical cycles-Consequences of damming. Aquatic Sciences, 2002, 64(1): 55-65.

[4] Furey P C, Nordin R N, Mazumder A. Littoral benthic macroinvertebrates under contrasting drawdown in a reservoir and a natural lake. Journal of the North American Benthological Society, 2006, 25(1): 19-31.

[5] McEwen D C, Butler M G. The effects of water-level manipulation on the benthic invertebrates of a managed reservoir. Freshwater Biology, 2010, 55(5): 1086-1101.

[6] Strskraba M, Tundisi J G. Guidelines of Lake Management (Volume 9): Reservoir Water Quality Management. Shiga: International Lake Environment Committee of UNEP, 1999.

[7] Wetzel R G. Limnology, Lake and River Ecosystems. 3rd ed. London: Academic Press, 2001.

[8] Moreno-Ostos E, Cruz-Pizarro L, Basanta A, George D G. The spatial distribution of different phytoplankton functional groups in a Mediterranean reservoir. Aquatic Ecology, 2008, 42(1): 115-128.

[9] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望. 湖泊科学, 2012, 24(2): 169-177.

[10] 曹明, 蔡庆华, 刘瑞秋, 渠晓东, 叶麟. 三峡水库及香溪河库湾理化特征的比较研究. 水生生物学报, 2006, 30(1): 20-25.

[11] 朱爱民, 李嗣新, 胡俊, 周连凤, 郑志伟, 赵先富, 董方勇. 三峡水库支流拟多甲藻水华的形成机制. 生态学报, 2014, 34(11):

3071-3080.

[12] 韩新芹, 叶麟, 徐耀阳, 蔡庆华. 香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度动态及其影响因子分析. 水生生物学报, 2006, 30(1): 89-94.

[13] 张敏, 蔡庆华, 王岚, 徐耀阳, 孔令惠, 谭路. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华生消过程初步研究. 湿地科学, 2009, 7(3): 230-236.

[14] Shao M L, Xu Y Y, Cai Q H. Effects of reservoir mainstream on longitudinal zonation in reservoir bays. Journal of Freshwater Ecology, 2010, 25(1): 107-117.

[15] 张敏, 徐耀阳, 邵美玲, 蔡庆华. 三峡水库香溪河库湾底泥中总氮、总磷含量的时空分布. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2799-2805.

[16] 吕光俊, 熊邦喜, 刘敏, 杨学芬, 覃亮, 陈朋, 徐微, 刘俊利. 不同营养类型水库大型底栖动物的群落结构特征及其水质评价. 生态学报, 2009, 29(10): 5339-5349.

[17] 张敏, 邵美玲, 蔡庆华, 徐耀阳, 王岚, 孔令惠. 丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价. 湖泊科学, 2010, 22(2): 281-290.

[18] Phipps G L, Mattson V R, Ankley G T. Relative sensitivity of three freshwater benthic macroinvertebrates to ten contaminants. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1995, 28(3): 281-286.

[19] Pelletier M C, Gold A J, Heltshe J F, Buffum H W. A method to identify estuarine macroinvertebrate pollution indicator species in the Virginian Biogeographic Province. Ecological Indicators, 2010, 10(5): 1037-1048.

[20] 蒋万祥, 贾兴焕, 唐涛, 蔡庆华. 底栖动物功能摄食类群对酸性矿山废水的响应. 生态学报, 2016, 36(18), doi: 10.5846/stxb201504140760.

[21] Benson N G, Hudson P L. Effects of a reduced fall drawdown on benthos abundance in Lake Francis Case. Transactions of the American Fisheries Society, 1975, 104(3): 526-528.

[22] 黄真理, 李玉樑. 三峡水库水质预测和环境容量计算. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[23] 蔡庆华. 水域生态系统观测规范——中国生态系统研究网络(CERN)长期观测规范丛书. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

[24] McCune B, Mefford M J. PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data. 4th ed. Gleneden Beach, Oregon: MjM Software Design, 1999.

[25] Vogiatzakis I N, Griffiths G H, Mannion A M. Environmental factors and vegetation composition, Lefka Ori massif, Crete, S. Aegean. Global Ecology and Biogeography, 2003, 12(2): 131-146.

[26] 邵美玲. 水库群底栖动物生态学研究——以三峡水库湖北段和香溪河流域为例[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2008.

[27] Kaster J L, Jacobi G Z. Benthic macroinvertebrates of a fluctuating reservoir. Freshwater Biology, 1978, 8(3): 283-290.

[28] Newrkla P, Wijegoonawardana N. Vertical distribution and abundance of benthic invertebrates in profundal sediments of Mondsee, with special reference to oligochaetes. Hydrobiologia, 1987, 155(1): 227-234.

[29] Cowell B C, Hull Jr H C, Fuller A. Recolonization of small-scale disturbances by benthic invertebrates in Florida freshwater ecosystems. The Florida Entomologist, 1987, 70(1): 1-14.

[30] Richardson S M, Hanson J M, Locke A. Effects of impoundment and water-level fluctuations on macrophyte and macroinvertebrate communities of a dammed tidal river. Aquatic Ecology, 2002, 36(4): 493-510.

[31] Morse J W, Beazley M J. Organic matter in deepwater sediments of the Northern Gulf of Mexico and its relationship to the distribution of benthic organisms. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2008, 55(24-26): 2563-2571.

[32] Beckmann M C, Schöll F, Matthaei C D. Effects of increased flow in the main stem of the River Rhine on the invertebrate communities of its tributaries. Freshwater Biology, 2005, 50(1): 10-26.

[33] Begon M, Harper J L, Townsend C R. Ecology: Individuals, Populations and Communities. New York, USA: Wiley-Blackwell, 1996.

[34] Oliver D R. Life history of the Chironomidae. Annual Review of Entomology, 1971, 16: 211-230.

[35] Bazzanti M, Seminara M. Profundal macrobenthos structure as a measure of long-term environmental stress in a polluted lake. Water, Air, & Soil Pollution, 1987, 33(3/4): 435-442.

[36] Shao M L, Xie Z C, Han X Q, Cao M, Cai Q H. Macroinvertebrate community structure in Three-Gorges Reservoir, China. International Review of Hydrobiology, 2008, 93(2): 175-187.

[37] Zhang M, Shao M L, Xu Y Y, Cai Q H. Effect of hydrological regime on the macroinvertebrate community in Three-Gorges Reservoir, China. Quaternary International, 2010, 226(1/2): 129-135.

[38] Godlewska M, Mazurkiewicz-Boroń G, Pociecha A, Wilk-Woźniak E, Jelonek M. Effects of flood on the functioning of the Dobczyce reservoir ecosystem. Hydrobiologia, 2003, 504(1/3): 305-313.

[39] Zhang M, Xu Y Y, Shao M L, Cai Q H. Sedimentary nutrients in the mainstream and its five tributary bays of a large subtropical reservoir (Three Gorges Reservoir, China). Quaternary International, 2012, 282: 171-177.